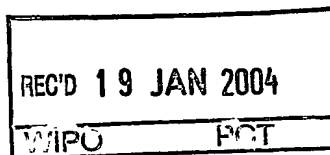




EP03/13387



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 102 60 673.0

Anmeldetag: 23. Dezember 2002

Anmelder/Inhaber: Mattson Thermal Products GmbH, Dornstadt/DE

Bezeichnung: Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage

IPC: G 01 J, H 01 L

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 20. November 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Stark

Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage

- 5 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Objekts vorzugsweise eines Substrats wie z.B. eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage, bei der das Objekt bzw. das Substrat mit Strahlungsquellen erhitzt wird.
- 10 Schnellheizanlagen zum thermischen Behandeln von Substraten wie z.B. Halbleiterwafern sind bei der Halbleiterherstellung weitgehend bekannt. Sie werden zur thermischen Behandlung der Wafer eingesetzt, die vorzugsweise aus Silizium bestehen, die aber auch aus Verbindungshalbleitern wie z.B. II-VI, III-V und IV-IV Halbleitern bestehen können. Ein wichtiges Merkmal bei der
- 15 thermischen Behandlung der Halbleiterwafer in einer Schnellheizanlage ist eine genaue Steuerung bzw. Regelung der Wafertemperatur während der thermischen Behandlung. Diese Steuerung bzw. Regelung der Wafertemperatur erfordert wiederum eine genaue Bestimmung der Wafertemperatur während der thermischen Behandlung, um die Schnellheizanlage entsprechend zu
- 20 steuern bzw. zu regeln. Die vorliegende Erfindung bezieht sich speziell auf den Aspekt der Temperaturbestimmung eines Halbleiterwafers während seiner thermischen Behandlung in einer Schnellheizanlage.
- 25 Unterschiedliche Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage sind bekannt. Einerseits ist es bekannt, Thermoelemente an den Halbleiterwafern selbst und/oder in seiner unmittelbaren Nähe anzubringen, um deren Temperatur zu ermitteln. Dabei ergibt sich jedoch das Problem, dass die Thermoelemente einerseits eine aufwendige Anbringung an den Halbleiterwafern erfordern und andererseits zu lokalen
- 30 Temperaturinhomogenitäten führen, da sie mit den Halbleiterwafern im allgemeinen in thermisch leitendem Kontakt stehen müssen und ferner das Strahlungsfeld in der Schnellheizanlage zumindest in der Nähe des Thermoelements beeinflussen.

Ein weiteres, kontaktloses Verfahren, das beispielsweise aus den auf die Anmelderin zurückgehende Patentanmeldungen und Patente DE-A-19852320, US 6,191,392 und US 6,396,363 bekannt ist, verwendet eine kontaktlose

5 Temperaturmessung. Bei dieser kontaktlosen Temperaturmessung ist ein erstes Pyrometer vorgesehen, das auf eine Seite des Wafers gerichtet ist, um vom Wafer kommende Strahlung zu erfassen, die sowohl Wärmestrahlung des Wafers als auch am Wafer reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen beinhaltet. Ferner ist ein zweites Pyrometer vorgesehen, das auf die Strahlungsquellen selbst gerichtet ist, um von den Strahlungsquellen ausgehende Strahlung, die mit einer Modulation versehen ist, zu erfassen. Die Modulation der Strahlungsquellen ist dabei derart gewählt, dass sie sich nicht in der Wärmestrahlung des Wafers niederschlägt, aber in der am Wafer reflektierten Strahlung der Strahlungsquellen messbar ist. Anhand eines bestimmten Algorithmus lässt sich die am ersten Pyrometer gemessene Wärmestrahlung des Wafers von der am Wafer reflektierten Strahlung der Strahlungsquelle bis zu einem gewissen Grade trennen. Aus der Wärmestrahlung lässt sich dann die Temperatur des Wafers bestimmen.

20 Diese Art der Temperaturbestimmung erfordert jedoch zwei Pyrometer oder Detektoren, nämlich einen sogenannten Waferpyrometer (oder allgemein einen Detektor zur Messung der vom Wafer emittierten und am Wafer reflektierten bzw. durch den Wafer hindurch transmittierten Strahlung) und einen Lampenpyrometer (bzw. eine zweites Meßsystem zur Erfassung der von den Lampen oder Strahlungsquellen emittierten Strahlung), die jeweils mit hohen Kosten verbunden sind. Darüber hinaus erfasst das Lampenpyrometer bzw. das zweite Meßsystem nicht nur von den Strahlungsquellen stammende Strahlung, sondern teilweise auch von dem Wafer stammende Strahlung, was eine genaue Temperaturermittlung des Halbleiterwafers erschwert und zusätzliche Mittel zur genauen Bestimmung der Lampenstrahlung erfordert, wie dies in der auf die Anmelderin zurückgehenden Patentanmeldung DE-A-19852321 beschrieben ist. Zusätzliche Probleme ergeben sich bei hoher Dynamik des Schnellheizsystems hinsichtlich des Temperatur-Zeit-Verhaltens

des Wafers. Werden z.B. hohe Aufheizraten des Wafers von über $250^{\circ}\text{C}/\text{sek.}$ realisiert, so enthält das Fourier-Spektrum, d.h. das Frequenzspektrum der Strahlungsenergie auch Frequenzkomponenten im Bereich der Modulationsfrequenz der Strahlungsquellen, wodurch ein korrektes Erfassen der Beiträge aus der Modulation innerhalb der Bereiche hoher Dynamik erschwert wird. Diese wiederum erschwert die Regelung bzw. Steuerung der Schnellheizanlage in Bereichen hoher Temperaturdynamik. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Sensorempfindlichkeit, bzw. aus den Anforderungen hinsichtlich Meßgenauigkeit, da die Beiträge der modulierten Strahlung sehr genau zu ermitteln sind, denn mittels dieser erfolgt eine in-situ Emissivitäts- und/oder Transmissivitätsbestimmung des Objekts (des Wafers).

Ausgehend von dem oben genannten Stand der Technik liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage, bei der Substrat mit einer Strahlungsquelle erhitzt wird, vorzusehen, das auf einfache und kostengünstige Weise eine gute Temperaturbestimmung des Halbleiterwafers ermöglicht.

Erfindungsgemäß weist das Verfahren das Erfassen einer Ansteuergröße der Strahlungsquellen, das Erfassen einer Messgröße eines Objekts in der Schnellheizanlage, das Bestimmen eines Vorhersagewerts der Messgröße des Objekts, das Bestimmen einer Regelgröße aus der Differenz zwischen der erfassten Messgröße und dem Vorhersagewert der Messgröße und das Bestimmen wenigstens einer Zustandsvariablen eines Zustands des Halbleiterwafers bzw. eines Zustandes des Systems aus Halbleiterwafer und Schnellheizanlage anhand eines Modells aus Schnellheizanlage und Objekt (Halbleiterwafer) unter Verwendung der Ansteuergröße der Strahlungsquellen und der Regelgröße vor, wobei das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße wenigstens teilweise anhand der bestimmten Zustandsvariablen erfolgt.

Dieses Verfahren ermöglicht auf einfache und kostengünstige Weise das Bestimmen wenigstens einer Zustandsvariablen eines Zustands, vorzugsweise eines Zustandes aus dem System des Halbleiterwafers und der Schnellheizanlage anhand eines Modells das vorzugsweise mehrere Teilmodelle umfaßt, in das einerseits wenigstens eine Ansteuergröße der Schnellheizanlage wie z.B. eine Ansteuergröße der Strahlungsquellen, und andererseits wenigstens eine bestimmte Regelgröße eingeht. Die Regelgröße wird durch einen Algorithmus ermittelt, der eine erfasste Messgröße eines Objekts in der Schnellheizanlage mit einem Vorhersagewert der Messgröße des Objekts vergleicht und darauf gerichtet ist, die Differenz zwischen diesen zwei Werten zu minimieren. Desto kleiner die Differenz, desto besser beschreibt die anhand des Modells bestimmte Zustandsvariable den tatsächlichen Zustand des Systems aus Halbleiterwafer (Objekt) und Schnellheizanlage, und damit auch den Zustand des Objekts (Halbleiterwafers), wodurch sich neben anderen Variablen dieses Zustandes insbesondere die Temperatur des Objekts bzw. des Halbleiterwafers bestimmen läßt. Der Zustand des Systems aus Objekt und Schnellheizanlage bzw. des Objekts ist im allgemeinen ein Tensor n -ter Stufe mit $n \geq 0$, er kann also insbesondere von skalarer ($n=0$), vektorartiger ($n=1$) oder matrizenförmiger Struktur ($n=2$) sein, wobei die Elemente des Tensors in der folgenden Anmeldung vereinfacht auch als Zustandsvariable bezeichnet sein sollen.

Vorzugsweise umfaßt die Zustandsvariable wenigstens die Temperatur des Halbleiterwafers. Es ist aber auch möglich, dass die Zustandsvariable etwas anderes darstellt, aus dem die Temperatur des Halbleiterwafers ableitbar ist.

Der besondere Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahren liegt darin, dass lediglich ein Sensor bzw. ein Pyrometer zum Erfassen einer Meßgröße erforderlich ist, um dann den Zustand des Systems aus Objekt (Halbleiterwafer) und Schnellheizanlage so zu bestimmen, daß z.B. der Zustand des Objekts hinsichtlich seiner Temperatur und/oder etwaiger optischer Eigenschaften wie Emissivität, Transmittivität und/oder Reflektivität bestimmt werden kann. Ein Bestimmen der Lampen- oder Strahlungsquellenintensität mittels eines weite-

ren Detektors entfällt somit und damit stellt das erfindungsgemäße Verfahren eine erhebliche Vereinfachung hinsichtlich Meßgenauigkeit und meßtechnischem Aufwand dar. Ferner erlaubt die vorliegende Erfindung auch bei hoher Systemdynamik, d.h. bei z.B. hohen Aufheiz- und/oder Abkühlraten des Wafers ein nahezu störungsfreies Steuern und/oder Regeln der Schnellheizanlage, da etwaige Frequenzkomponenten (Fourierkomponenten), welche aus der Systemdynamik resultieren, im Model des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigbar sind, so dass diese Komponenten von der tatsächlichen Modulationsfrequenz der Strahlungsquellen wie z.B. der Lampen separierbar sind, wodurch die Störanfälligkeit und die Leistungsfähigkeit der Schnellheizanlage insbesondere bei hohen Aufheizraten erheblich verbessert wird. Aufheizraten von bis zu 500°C lassen sich heute bereits im Labor und teils im Bereich der Massenproduktion der Chipherstellung zuverlässig realisieren.

15 Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst die Messgröße wenigstens vom Halbleiterwafer kommende Strahlung, die vorzugsweise durch einen Pyrometer erfasst wird. Die Strahlung kann allerdings auch durch andere Mittel erfaßt werden wie z.B. mittels eines in einem definiert zum Wafer beabstandeten Thermoelements. Ein Pyrometer besitzt eine hohe Messgenauigkeit und ermöglicht ferner ein kontaktloses Messverfahren der vom Halbleiterwafer kommenden Strahlung. Dabei umfasst die durch den Pyrometer erfasste Strahlung wenigstens eine Wärmestrahlung des Wafers sowie am Wafer reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen und abhängig vom Wafermaterial und der Wafertemperatur teilweise auch Strahlung die durch den Wafer hindurch transmittiert wird. Vorzugsweise weist die Strahlung der Strahlungsquellen eine Modulation auf, die eine Unterscheidung zur direkten Wärmestrahlung des Wafers erlaubt. Damit ist es möglich die am Wafer reflektierte Strahlung und/oder die durch den Wafer hindurch transmittierte Strahlung mittels Modulationsparameter der Strahlungsquellenmodulation zu identifizieren, wie dies z.B. in den auf die Anmelderin zurückgehenden Patenten US 6,191,392 und US 6,396,363 näher beschrieben ist, wobei im vorliegenden Verfahren, wie bereits erwähnt, eine meßtechnische Erfassung der Strahlungsquellenintensität entfällt.

- Alternativ oder zusätzlich zur obigen Ausführungsform umfaßt die Meßgröße eine von einem Gegenstand kommende Strahlung z.B. berührungslos mittels eines Pyrometers und/oder die Meßgröße erfaßt die Temperatur oder eine mit der Temperatur des Gegenstandes in Beziehung stehende Meßgröße durch direkte Berührung z.B. mittels eines Thermoelements. Dabei steht der Gegenstand mit dem Objekt, dem Halbleiterwafer, derart in Beziehung, daß eine Temperaturänderung des Objekts (Halbleiterwafers) sich in einer Temperaturänderung bzw. in einer Änderung der Meßgröße des Gegenstandes derart auswirkt, so daß z.B. mittels eines Modells und/oder einer Funktion aus der Kenntnis des Zustandes (z.B. Temperatur oder einer mit der Temperatur in Beziehung stehenden Meßgröße oder der Meßgröße) des Gegenstandes auf die Temperatur und/oder den Zustand des Objekts (Wafers) geschlossen werden kann. Der Gegenstand kann z.B. ein zweiter Wafer oder eine „Abdeckplatte“ sein, wobei diese etwas vom Wafer beabstandet über und/oder unter dem eigentlichen Wafer angebracht ist. Der Gegenstand kann ferner z.B. ein Bereich der Prozeßkammer, ein in der Nähe einer Objekt- bzw. Waferseite befindliche wenigstens einen Teil der Waferstrahlung reflektierende Fläche, ein Bereich einer Quarzscheibe (z.B. die Teil einer Quarzprozesskammer ist) die in der Nähe des Objekts angeordnet ist oder ein zusätzlich in die Prozesskammer eingebrachter Gegenstand sein, der sensitiv auf etwaige Temperaturänderungen und/oder auf die Temperatur des Wafers (Objekts) hinsichtlich seiner Meßgröße reagiert.
- Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung umfasst das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße das Bestimmen eines Wafer-Vorhersagewerts, der einen durch den Wafer bewirkten Anteil am Pyrometersignal vorhersagt. Da das erfasste Signal sowohl einen Waferanteil als auch einen Anteil der Strahlungsquellen umfasst, ist eine separate Bestimmung des Waferanteils vorteilhaft. Dabei umfasst das Bestimmen des Wafer-Vorhersagewerts vorzugsweise das Bestimmen eines Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Wafers im Bereich einer Messwellenlänge des Pyrometers anhand der ermittelten Zustandsvariablen und einer ermittelten Emissivi-

tät des Wafers. Vorzugsweise wird anschließend der Wafer-Vorhersagewert anhand eines Modells unter Berücksichtigung des zuvor ermittelten Intensitätswert der Waferstrahlung im Bereich der Messwellenlänge des Pyrometers und einer ermittelten Emissivität des Wafers bestimmt. Somit lässt sich der durch den Wafer bewirkte Anteil am Pyrometersignal vorteilhafterweise vorhersagen. Dabei berücksichtigt das Modell einen Einfluss der Kammer auf die effektive Emissivität des Wafers, da die Kammergeometrie und Reflektivität der Kammerwände scheinbar emissivitätserhöhend wirken können.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung umfasst das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße ferner das Bestimmen eines Lampen-Vorhersagewerts (Strahlungsquellen-Vorhersagewerts) bzw. allgem. eines Vorhersagewerts der Strahlungsquellen welche bevorzugt Lampen wie z.B. Halogenlampen beliebiger Form, Blitzlampen und/oder Bogenlampen beliebiger Form oder Laser-Lichtquellen sind. Allgemein können Strahlungsquellen auch heiße Flächen wie z.B. erhitzte Platten sein. Der Lampen-Vorhersagewert bzw. Strahlungsquellen-Vorhersagewert sagt einen durch die Strahlungsquellen bewirkten Anteil am Pyrometersignal oder Detektorsignal vorher. Hierdurch lässt sich ein insbesondere durch Reflexion und/oder Transmission am Wafer bewirkter Anteil der von den Strahlungsquellen stammenden Strahlung am Pyrometersignal vorhersagen. Dabei umfasst das Bestimmen des Lampen-(Strahlungsquellen-) Vorhersagewerts vorzugsweise das Bestimmen eines Breitsband-Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Wafers anhand der ermittelten Zustandsvariable und einer ermittelten Emissivität des Wafers. Vorzugsweise umfasst das Bestimmen des Lampen-Vorhersagewerts ferner das Bestimmen eines Intensitätswerts für die Strahlungsquellen anhand eines Lampenmodells bzw. Strahlungsquellenmodells und der Ansteuergröße der Strahlungsquellen. Dabei berücksichtigt das Lampen- bzw. Strahlungsquellenmodell vorzugsweise Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Strahlungsquellen untereinander und/oder mit dem Wafer, in dem der Breitband-Intensitätswert der Wärmestrahlung des Wafers in die Eingangsgröße des Lampen- Strahlungsquellenmodells eingeht. Ferner berücksichtigt das Lampenmodell vorzugsweise Wechselwirkungen zwischen

den einzelnen Strahlungsquellen wie z.B. zwischen den Lampen einer aus mehreren Lampen bestehenden Lampenbank. Sowohl der Halbleiterwafer als auch die unterschiedlichen Strahlungsquellen untereinander besitzen Wechselwirkungen auf den jeweiligen Intensitätswert einer Strahlungsquelle. Durch

5 Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen z.B. im Lampen- bzw. Strahlungsquellenmodell lassen sich besonders genaue Intensitätswerte für die einzelnen Strahlungsquellen voraussagen.

Um das Modell für die Lampen bzw. Strahlungsquellen zu vereinfachen und

10 die erforderliche Rechenleistung zu reduzieren, sind die Strahlungsquellen vorzugsweise als Gruppen zusammengefasst und das Bestimmen des Intensitätswerts erfolgt für die jeweiligen Gruppen. Dabei erfolgt die Bestimmung des Intensitätswerts für die jeweiligen Gruppen anhand wenigstens eines, vorzugsweise jedoch wenigstens zweier Repräsentanten der Gruppe, um eine

15 höhere Genauigkeit zu erreichen. Dabei werden die Strahlungsquellen vorzugsweise wenigstens innerhalb einer Gruppe mit derselben Ansteuergröße angesteuert.

Beim Bestimmen des Lampen- (Strahlungsquellen-) Vorhersagewerts wird

20 vorzugsweise ein Modell verwendet, das den am Wafer reflektierten Anteil der Lampenstrahlung bzw. Strahlungsquellenstrahlung, der in das Gesichtsfeld des Pyrometers fällt vorhergesagt, und zwar anhand des bestimmten Intensitätswerts der Strahlungsquellen und einer ermittelten Emissivität des Wafers. Dabei ermittelt das Modell vorzugsweise die Reflektivität des Wafers anhand

25 der ermittelten Emissivität, um den reflektierten Anteil der Lampenstrahlung zu bestimmen. Ferner berücksichtigt das Modell vorzugsweise die Kammergeometrie, um auch mehrfach Reflexionen zu berücksichtigen.

Vorzugsweise wird der Vorhersagewert der Messgröße durch Addieren des

30 Wafers-Vorhersagewerts und des Lampen- (Strahlungsquellen-) Vorhersagewerts gebildet, die zusammen das Messsignal des Pyrometers vorhersagen sollen. Dabei beinhaltet der Wafer-Vorhersagewert im Wesentlichen einen Gleichanteil des Vorhersagewerts der Messgröße und der Lampen-

Vorhersagewert im Wesentlichen einen Gleichanteil sowie einen Wechselanteil des Vorhersagewerts der Messgröße. Der Wechselanteil des Vorhersagewerts der Messgröße ergibt sich im Wesentlichen aus der Modulation der Strahlung der Strahlungsquellen, die eine Unterscheidung der beiden Signale ermöglichen soll.

Vorzugsweise wird für die Ermittlung der Emissivität des Wafer wenigstens teilweise der Vorhersagewert der Messgröße herangezogen. Dabei wird der Vorhersagewert der Messgröße vorzugsweise gefiltert, um dessen Wechselanteil zu ermitteln, der im Wesentlichen dem modellierten Anteil der von den Strahlungsquellen stammenden und am Wafer reflektierten Strahlung entspricht. Nun wird die Emissivität des Wafers vorzugsweise durch ein Modell ermittelt, das den Wechselanteil des Vorhersagewerts der Messgröße und einen vom Pyrometer erfassten Wechselanteil der vom Halbleiter kommenden Strahlung verwendet. Für eine Homogenisierung der Wafertemperatur in der Schnellheizanlage wird dieser vorzugsweise relativ zu den Lampen bzw. Strahlungsquellen in Rotation versetzt, wobei die Rotation (Drehung) einen Wechselanteil der von dem Halbleiterwafer kommenden Strahlung, beispielsweise durch Inhomogenitäten auf der Waferoberfläche, bzw. Inhomogenitäten auf einer mitrotierenden Waferauflagevorrichtung (Waferträger) welcher den Wafer haltet und ihn gegebenenfalls in Rotation versetzt, erzeugen kann. Dieser Wechselanteil wird für die Ermittlung eines guten Emissivitätswerts bzw. bei der Bestimmung von Zustandsvariablen wie z.B. die Rotationsgeschwindigkeit (und/oder Rotationsphase) vorzugsweise im Modell zum Ermitteln der Emissivität bzw. im Modell zur Ermittlung einer Zustandsvariablen des Wafers und/oder der Schnellheizanlage berücksichtigt. Vorzugsweise wird die im Modell zum Ermitteln der Emissivität ermittelte Emissivität anschließend skaliert, bevor sie anderen Prozessen zugeführt wird, um eine Kompatibilität hinsichtlich der verwendeten Werte vorzusehen.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird der Halbleiterwafer in dem Modell zum Ermitteln der Zustandsvariable als sogenannter black body angesehen, so dass eine Emissivitätsermittlung für das Ermitteln der Zu-

standsvariable nicht notwendig ist, und das Modell lediglich die Ansteuergröße der Strahlungsquellen, sowie die bestimmte Regelgröße benötigt, um die Zustandsvariable zu ermitteln.

- 5 Die bei der vorliegenden Erfindung eingesetzten Modelle können auf physikalischen Modellen beruhen, d.h. die Modelle beschreiben die tatsächlich zugrundeliegenden physikalischen Effekte möglichst genau, oder sie können empirisch sein, d.h. z.B. mittels einer Systemübertragungsfunktion beschrieben werden. Eine Beschreibung der Modelle mittels neuronaler Netze kann
- 10 ebenfalls vorteilhaft sein. Ferner kommen vorzugsweise mehrere Teilmodelle zum Einsatz, die erst in ihrer Gesamtheit und mittels ihrer gegenseitigen Wechselwirkung ein Gesamtmodell des Systems Objekt (Substrat) und Schnellheizanlage bilden.
- 15 Ein weitere Aspekt der vorliegenden Erfindung bezieht sich auf die Kalibration von wenigstens einem Teilmodell wie z.B. dem Einfluß einzelner Strahlungsquellen auf die Meßgröße, dies kann z.B. mittels geeigneter Kalibrationsparameter im Kammermodell und/oder Lampenmodell berücksichtigt werden. Bei derartigen Kalibrationen der Einzelmodelle kann ferner die Konversionskurve
- 20 der Meßanordnung ermittelt werden, um ein Höchstmaß an Meßgenauigkeit zu erreichen.

Die vorliegende Erfindung wird nachfolgend anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert:

25

In der Zeichnung zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Schnellheizanlage, bei der das erfindungsgemäße Verfahren eingesetzt werden kann;

- 30 Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Teils der Schnellheizanlage gemäß Fig. 1, in der der Einfallswinkel oder Öffnungswinkel eines Strahlungssensors und der Einfluss unterschiedlicher Elemente in der

Schnellheizanlage auf das gemessene Signal des Strahlungssensors dargestellt ist;

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Temperaturregelung in einer RTP-Anlage;

5 Fig. 4 ein Blockdiagramm, das ein Modell zur Bestimmung einer Wafertemperatur in einer Schnellheizanlage zeigt;

Fig. 5 eine schematische Darstellung eines Teilaspektes bei der Ermittlung der Wafertemperatur in einer Schnellheizanlage;

10 Fig. 6 eine schematische Darstellung eines weiteren Teilaspektes bei der Ermittlung der Wafertemperatur in einer Schnellheizanlage; und

Fig. 7 eine schematische Darstellung von Funktionsblöcken eines Lampenmodells, das bei der Ermittlung der Wafertemperatur in einer Schnellheizanlage verwendet wird.

15 Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Schnellheizanlage 1 für die thermische Behandlung eines Halbleiterwafers 2.

Die Schnellheizanlage 1 besitzt ein Gehäuse 4 bestehend aus einer oberen Wand 6, einer unteren Wand 7 und einer dazwischen angeordneten Seitenwand 8. Die Wände 6, 7 und 8 bilden gemeinsam eine Kammer 10. Die Kammer 10 ist durch zwei Quarzplatten 12 in einen oberen Kammerbereich 14, einen mittleren Kammerbereich 15 und einen unteren Kammerbereich 16 unterteilt. In den oberen und unteren Kammerbereichen 14, 16 sind jeweils eine Vielzahl von Strahlungsquellen 18 in der Form von Halogenlampen vorgesehen. Alternativ oder zusätzlich können auch andere Strahlungsquellen, wie beispielsweise Bogenlampen, Blitzlampen oder Laser vorgesehen sein, wobei die Strahlungsquellen eine hohe Dynamik besitzen, um ein rasches Aufheizen des Wafers 2 zu ermöglichen. Die Quarzplatten 12 sind im Wesentlichen für die Strahlung der Strahlungsquellen 18 durchlässig.

30 Der mittlere Kammerabschnitt 15 bildet eine Prozesskammer 15 in der der Wafer 2 über eine geeignete, nicht näher dargestellte Halteeinrichtung aufgenommen ist. Die Halteeinrichtung kann eine Rotationsvorrichtung zur Rotation

des Wafers 2 umfassen, die in der Lage ist, den Halbleiterwafer 2 innerhalb der Prozesskammer zu drehen, d.h. den Wafer relativ zu den Strahlungsquellen zu rotieren. Im Bereich der Prozesskammer weist die Seitenwand 8 eine Eingabe-/Ausgabeöffnung 20 zum Be- und Entladen des Halbleiterwafers 2 auf. Die Eingabe-/Ausgabeöffnung 20 ist über einen geeigneten, nicht näher dargestellten Mechanismus, verschließbar. Vorzugsweise aber nicht notwendigerweise ist der Eingabe-/Ausgabeöffnung 20 gegenüberliegend in der Seitenwand 8 eine Gaseinlassöffnung 22 zum Einleiten eines Gases in den mittleren Kammerabschnitt 15, d.h. den Prozesskammerabschnitt, vorgesehen.

Innerhalb der Prozesskammer 15 ist ferner vorzugsweise ein Kompensationsring 24 vorgesehen, der in der Lage ist, während der thermischen Behandlung auftretende Randeffekte hinsichtlich Temperaturverteilung über den Wafer, zu kompensieren.

Vorzugsweise ist in der unteren Gehäusewand 7 eine Öffnung zum Einführen eines Strahlungsmessgerätes 26, insbesondere eines Pyrometers, vorgesehen. Das Pyrometer 26 besitzt ein auf den Wafer 2 gerichtetes Blickfeld, das mit einer gestrichelten Linie in Fig. 1 dargestellt ist. Das Blickfeld ist derart angeordnet und besitzt einen derartigen Öffnungswinkel α , dass direkt von den Strahlungsquellen stammende Strahlung nicht in das Blickfeld des Pyrometers 26 fällt, oder eine derartige Strahlung durch das Pyrometer nur in sehr reduziertem Maße erfaßt wird. Jedoch kann am Wafer 2 reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen in das Blickfeld des Pyrometers 26 fallen, wie schematisch in Fig. 2 mittels des Strahls C dargestellt ist.

Fig. 2 zeigt schematisch einen Teilbereich der Schnellheisanlage 1, und insbesondere unterschiedliche Strahlungskomponenten, die in das Blickfeld (α) des Pyrometers 26 fallen. Zunächst fällt direkt vom Wafer 2 stammende Wärmestrahlung in das Blickfeld des Pyrometers, sofern sie von einem Punkt im direkten Blickfeld des Pyrometers 26 stammt, wie durch den Pfeil A in Fig. 2 dargestellt ist. Ferner fällt Wärmestrahlung des Wafers 2 in das Blickfeld

des Pyrometers 26, die an der unteren Kammerwand 7 und am Wafer 2 selbst reflektiert wird, wie durch den gestrichelten Pfeil B dargestellt ist.

5 Darüber hinaus fällt auch von den Strahlungsquellen 18 stammende Strahlung in das Blickfeld des Pyrometers, in dem sie am Wafer 2 reflektiert wird, wie durch den Pfeil C dargestellt ist. Natürlich sind unterschiedliche Reflexionsmuster zu den dargestellten möglich, so dass unterschiedliche Strahlungsanteile sowohl vom Wafer als auch von den Strahlungsquellen in das Blickfeld des Pyrometers fallen. Bei einer Darstellung in Fig. 2 wird davon ausgegan-

10 gen, dass der Wafer 2 für die Strahlung der Strahlungsquellen 18 im Wesentlichen undurchsichtig ist. Wenn dies nicht der Fall ist, kann auch von den oberen Strahlungsquellen 18 stammende Strahlung durch den Wafer 2 hindurch in das Blickfeld des Pyrometers 26 fallen.

15 Um eine Unterscheidung zwischen der Wärmestrahlung des Wafers 2 und der am Wafer 2 reflektierten Strahlung der Strahlungsquellen 18 zu ermöglichen, weist die Strahlung der Strahlungsquellen 18 eine Modulation auf. Dabei ist die Modulation derart gewählt, dass die Wärmestrahlung des Wafers 2 dieser Modulation nicht folgt. Um zwischen am Wafer reflektierter und durch den Wa-

20 fer hindurch transmittierter Strahlung zu unterscheiden, können oberhalb und unterhalb vom Wafer angeordnete Strahlungsquellen unterschiedliche Modulationsarten wie Modulationsfrequenz und/oder Modulationsphase aufweisen.

Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer Temperaturregelung einer Schnellheizanlage, die eine Temperaturbestimmung gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet.

25

In Fig. 3 ist die Schnellheizanlage, die auch als RTP-Anlage (Rapid Thermal Processing-Anlage) bezeichnet wird, durch den Block 30 dargestellt. Aus dem

30 Block 30 geht ein Sensorsignal zu einem Block 32, in dem eine Temperaturbestimmung gemäß der vorliegenden Erfindung stattfindet. Das Sensorsignal ist vorzugsweise das Signal des Pyrometers 26, das sowohl einen Wechselanteil als auch einen Gleichanteil beinhaltet. Bei opakem Wafer stammt der

Wechselanteil im Wesentlichen ausschließlich aus der am Wafer reflektierten Lampenstrahlung, während der Gleichanteil sowohl aus der Wärmestrahlung des Wafers als auch der am Wafer reflektierten Lampenstrahlung stammt. Ein opaker Wafer liegt bei Siliziumwafern etwa bei Temperaturen über 600°C vor,
 5 so dass etwaige durch den Wafer transmittierte Strahlung z.B. von einer Strahlungsquelle oberhalb des Wafers nicht mehr relevant ist.

Im Block 32 erfolgt eine Temperaturbestimmung des Wafers durch das nachfolgend noch näher beschriebene Verfahren. Die ermittelte Temperatur, welche die tatsächliche Temperatur des Wafers (T_{ist}) bestmöglich repräsentieren soll wird an eine Steuereinheit im Block 34 weitergeleitet. Die Steuereinheit im Block 34 vergleicht die Isttemperatur (T_{ist}) mit einem eingehenden Temperatursollwert (T_{soll}) und regelt anhand des Vergleichs die Ansteuerleistung der Lampen in der Schnellheizanlage 30. Hierzu wird an die einzelnen Lampen
 15 z.B. eine effektive Spannung (U_{eff}) angelegt. Die Steuereinheit im Block 34 kann einen beliebigen Regler, wie beispielsweise einen PID-Regler oder einen modellbasierten Regler, der eine Vorwärtssteuerung beinhaltet, aufweisen. Jedenfalls wird der Wert des Ansteuersignals U_{eff} von der Steuereinheit im Block 34 auch an den Block 32 weitergeleitet, um für die Temperaturbestimmung eingesetzt zu werden. Die Temperaturbestimmung im Block 32 wird
 20 nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 4 bis 7 näher erläutert.

Fig. 4 zeigt in Blockdiagrammform die derzeit bevorzugte Ausführungsform eines Temperaturermittlungsverfahrens.

Die eigentliche Temperaturermittlung erfolgt im Block 40. Im Block 40 wird die Wafertemperatur anhand eines statischen Kammermodells, das ein Modell der Kammer, das wenigstens ein Modell der Kammereigenschaften, vorzugsweise ein Modell der in der Kammer befindlichen Objekte, vorzugsweise z.B.
 30 ein Wafermodell und optional ein Lampen- bzw. Strahlungsquellenmodell, beinhaltet. Zur Vereinfachung der jeweiligen Modelle werden vorzugsweise wenigstens teilweise idealisierte Parameter für die einzelnen Modelle verwendet. So wird der Wafer im Wafermodell beispielsweise als schwarzer Strahler oder

sogenannter Black Body mit einer Emissivität von eins angesehen. Als Einganggröße für die Ermittlung der Wafertemperatur dient die an die Gesamtheit der Lampen angelegte effektive Spannung ($U_{\text{eff-Lampen-komplett}}$), die beispielsweise von der Steuereinheit 34 gemäß Fig. 3 in dem Block 40 eingespeist wird. Die ermittelte Wafertemperatur wird ferner anhand einer Regelgröße Z angepasst. Alternativ oder zusätzlich zu den an den Lampen bzw. Strahlungsquellen angelegte effektive Spannung kann jeder Strahlungsquellenparameter dienen der geeignet ist, Aussagen über die von der Strahlungsquelle abgestrahlte Energie zu machen, so kann z.B. auch der Strom oder gar direkt gemessenen Strahlungsgrößen, durch welche die Strahlung der Strahlungsquellen ermittelbar sind, gewählt werden.

Die Regelgröße Z wird wiederum im Block 42 bestimmt und sie ist proportional zu einer Differenz zwischen einem gemessenen Waferpyrometersignal $(DC + AC)_{\text{kompl.-gem.}}$ und einem vorhergesagten Waferpyrometersignal $(DC + AC)_{\text{kompl.-vorh.}}$. Das gemessene Waferpyrometersignal entspricht dem vom Block 30 an den Block 32 gelieferten Sensorsignal gemäß Fig. 3. Dieses Waferpyrometersignal beinhaltet einen Gleichanteil sowie einen Wechselanteil. Der Gleichanteil wird im Wesentlichen durch am Wafer reflektierte Strahlung gebildet, wie durch den Pfeil C in Fig. 2 dargestellt ist. Zusätzlich beinhaltet der Gleichanteil Waferstrahlung, d.h. Wärmestrahlung des Wafers und einen Gleichanteil der am Wafer und/oder an den Kammerwänden der Prozesskammer und/oder des Gehäuses reflektierten Lampenstrahlung.

Das vorhergesagte Waferpyrometersignal ist ein Signal, das aus einem Wafer-Vorhersagewert $DC_{\text{Wafer-vorh.}}$ und einem Lampen-Vorhersagewert $(AC+DC)_{\text{Lampenrefl.-vorh.}}$ gebildet wird. Dabei enthält der Wafer-Vorhersagewert im Wesentlichen nur einen Gleichanteil, während der Lampen-Vorhersagewert einen Gleich- und Wechselanteil beinhaltet.

Der Wafer-Vorhersagewert wird aus der im Block 40 ermittelten Wafertemperatur T_{wafer} bestimmt. Die ermittelte Wafertemperatur wird zunächst an einen Block 44 weitergeleitet. Im Block 44 wird eine vorhergesagte Intensität der

Waferstrahlung im Pyrometermessbereich, beispielsweise bei $2,3\ \mu\text{m}$ bestimmt. Die Bestimmung erfolgt anhand der Wafertemperatur T_{wafer} und einer ermittelten Emissivität $E_{\text{wafer-skal}}$ des Wafers. Die Ermittlung der Emissivität wird nachfolgend noch näher erläutert.

5

Die vorhergesagte Intensität der Waferstrahlung $I_{\text{wafer-2,3}}$ wird anschließend an den Block 46 weitergeleitet. Im Block 46 wird der Anteil der Waferstrahlung im Pyrometersignal vorhergesagt, wobei der Anteil im Wesentlichen ein Gleichanteil ist, aber ggf. auch einen Wechselanteil beinhalten kann. Die Vorhersage erfolgt unter Verwendung eines Modells, in das die Intensität der Waferstrahlung im Pyrometermessbereich ($I_{\text{wafer-2,3}}$) sowie die ermittelte Emissivität $E_{\text{wafer-skal}}$ als variable Größen eingeht. Dabei enthält das Modell ferner ein Modell, das den Einfluss der Kammer auf die scheinbare Emissivität des Wafers berücksichtigt, d.h. eine scheinbare Emissivitätserhöhung durch die Reflexionseigenschaften der Prozesskammer bzw. der Kammerwände. Der vorhergesagte Anteil der Waferstrahlung im Pyrometersignal $DC_{\text{wafer-vorh.}}$ stellt den Wafer-Vorhersagewert dar, und wird an einen Addierer im Block 48 weitergeleitet, in dem er mit dem Lampen-Vorhersagewert addiert wird, um das vorhergesagte Waferpyrometersignal $(DC + AC)_{\text{Komplet-vorh.}}$ zu erhalten.

20

Der Lampen-Vorhersagewert wird separat zum Wafer-Vorhersagewert ermittelt. Dabei wird zunächst die Intensität der Lampenstrahlung anhand der an die Lampen angelegten effektiven Spannung oder einem anderen geeigneten Strahlungsquellenparameter mit einem Lampen- (Strahlungsquellen-)modell ermittelt, und zwar im Block 50. Die effektive, an die Lampen angelegte Spannung, wird beispielsweise aus der Steuereinheit im Block 32 gemäß Fig. 3 an den Block 50 geliefert. Zur Vereinfachung des Lampenmodells wird nicht die Intensität jeder einzelnen Lampe, von denen beispielsweise über fünfzig in der Schnellheizanlage vorgesehen sein können, bestimmt. Vielmehr sind vorzugsweise die Lampen in unterschiedliche Gruppen, beispielsweise vier Gruppen aufgeteilt, wobei die Lampen jeder Gruppe im Wesentlichen jeweils mit derselben Lampenspannung angesteuert werden. Bei dem bevorzugten

30

Ausführungsbeispiel erfolgt die Bestimmung des Intensitätswert für die jeweiligen Gruppen anhand wenigstens zweier Repräsentanten der Gruppe.

Das Lampenmodell ist so aufgebaut, dass es Wechselwirkungen zwischen
 5 den jeweiligen Lampenfilamenten berücksichtigt. Ferner berücksichtigt das
 Lampenmodell Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Lampen und der
 Waferstrahlung. Daher wird bei der Bestimmung der Intensität der Lampen-
 strahlung neben der angelegten effektiven Spannung der Lampen auch eine
 vorhergesagte Breitbandintensität $I_{\text{Wafer-vorh.}}$ der Waferstrahlung in das Lam-
 10 penmodell eingegeben. Die vorhergesagte Breitbandintensität der Waferstrah-
 lung wird im Block 52 bestimmt, und zwar anhand der im Block 40 ermittelten
 Wafertemperatur T_{wafer} und gegebenenfalls der ermittelten Emissivität.

Die Komponenten, die in das Lampenmodell eingehen, sind zur Verdeutli-
 15 chung nochmals in Fig. 7 dargestellt. Dabei bildet der Kreis 54 das eigentliche
 Lampenmodell. Aus dem Lampenmodell wird die Lampenstrahlung abgeleitet,
 wie durch den Kreis 56 dargestellt ist.

In das Lampenmodell 54 geht ein idealisiertes Lampenmodell ein, das die In-
 20 tensität der Lampenstrahlung in einem freien endlosen Raum modelliert. In
 das Lampenmodell 54 geht jedoch auch ein Korrekturparameter aus dem
 Block 60 ein, der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Lampenfilamen-
 ten der Lampen, insbesondere zwischen benachbarten Lampen berücksich-
 tigt. Diese Wechselwirkungen sind schematisch in dem in der rechten unteren
 25 Ecke in Fig. 7 dargestellten Diagramm angedeutet.

In das Lampenmodell 54 geht auch noch ein zweiter Korrekturparameter aus
 dem Kreis 62 ein, der Wechselwirkungen zwischen dem Lampenfilament und
 dem Wafer 2 berücksichtigt. Diese Wechselwirkungen sind ebenfalls in der
 30 schematischen Darstellung angedeutet.

Die jeweiligen Wechselwirkungen zwischen den Lampenfilamenten unterein-
 ander und zwischen den Lampenfilamenten und dem Wafer werden vorab an-

hand eines Referenzsensors ermittelt, wie durch den Kreis 64 dargestellt ist. Statt einer Messung mittels eines Referenzsensors ist es natürlich auch möglich, ein entsprechendes mathematisches Modell für die jeweiligen Wechselwirkungen vorzusehen.

5

Nun wird wieder auf die Fig. 4 Bezug genommen und die Bestimmung des Lampen-Vorhersagewerts weiter erläutert. Die im Block 50 bestimmte Intensität der Lampenstrahlung I_{lampen} wird nun an den Block 66 weitergeleitet. Im Block 66 wird der vorhergesagte Anteil der Lampenstrahlung im Pyrometersignal bestimmt. Die Bestimmung erfolgt durch ein Modell, das die Intensität der Lampenstrahlung I_{lampen} und die bestimmte Emissivität $E_{\text{wafer-skal.}}$ des Wafers als Eingangsgrößen verwendet. Das Modell beinhaltet eine Gewichtung für den Anteil der einzelnen Lampen, da die unterschiedlichen Lampen einen unterschiedlichen Einfluss auf das Pyrometersignal besitzen. Das Modell berücksichtigt den am Wafer reflektierten Anteil der Lampenstrahlung im Pyrometermessbereich, der in das Gesichtsfeld des Pyrometers fällt, wobei das Modell die Reflektivität des Wafers sowie die Kammergeometrie berücksichtigt. Die Reflektivität des Wafers wird wiederum aus der bestimmten Emissivität $E_{\text{wafer-skal.}}$ ermittelt. Im Wesentlichen gilt, dass die Reflektivität des Wafers gleich eins minus der Emissivität ist, sofern der Wafer für die Lampenstrahlung undurchsichtig ist.

10

15

20

25

Der vorhergesagte Anteil der Lampenstrahlung im Pyrometersignal ($AC + DC$)_{lampenreflektion-vorh.} wird als Lampen-Vorhersagewert an den Addierer im Block 48 geliefert und dort mit dem Wafer-Vorhersagewert addiert. Der Lampen-Vorhersagewert beinhaltet einen Gleichanteil, sowie einen Wechselanteil, wobei der Wechselanteil aus einer Modulation der Lampenintensität z.B. durch Modulation der effektiven angelegten Spannung stammt.

30

Wie schon erwähnt, wird im Block 48 der Wafer-Vorhersagewert mit dem Lampen-Vorhersagewert addiert, um das vorhergesagte Waferpyrometersignal zu erzeugen, das in den Block 42 geliefert wird. Im Block 42 wird eine Differenz zwischen dem tatsächlich gemessenen Waferpyrometersignal und

dem vorhergesagten Waferpyrometersignal ermittelt und daraus eine Regelgröße Z bestimmt, die wiederum einen Einfluss auf die ermittelte Wafertemperatur T_{wafer} im Block 40 besitzt. Dabei ist das System so ausgelegt, dass die Differenz bei fortlaufendem Durchlauf der obigen Schleifen gegen Null konvergiert. Sobald die Differenz bei Null ist, ist davon auszugehen, dass die ermittelte Wafertemperatur T_{wafer} der tatsächlichen Wafertemperatur entspricht.

Fig. 5 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines Systems zur Bestimmung der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage. In Fig. 5 werden dieselben Bezugszeichen wie in den vorhergehenden Figuren verwendet, sofern ähnliche oder äquivalente Elemente beschrieben werden.

In Fig. 5 ist schematisch eine Schnellheizanlage 1 mit Heizlampen 18 dargestellt. In der Schnellheizanlage 1 ist ein Halbleiterwafer 2 zu dessen thermischer Behandlung angeordnet. Ein Pyrometer 26 ist auf eine Seite des Wafers 2 gerichtet.

Die Heizlampen 18 werden über eine Ansteuereinheit 70 angesteuert.

Während der thermischen Behandlung des Wafers 2 wird von dem Wafer kommende Strahlung, die sowohl Waferstrahlung als auch am Wafer reflektierte Strahlung beinhaltet im Pyrometer 26 gemessen, und das Messsignal wird an den Block 72 weitergeleitet. Das Messsignal ist auch bei 74 schematisch dargestellt.

Neben der tatsächlichen Schnellheizanlage 1 ist in dem gestrichelten Kasten 76 ein Modell einer Schnellheizanlage 1' dargestellt. Die Merkmale der modellhaften Schnellheizanlage werden jeweils mit einem Apostroph ' gekennzeichnet. Das Modell der Schnellheizanlage 1' beinhaltet z.B. ein Modell der Lampen 18', ein Modell des Wafers 2', ein Modell der Kammer 4' sowie ein Modell des Pyrometers 26'. Das Ansteuersignal der Heizlampen 18 wird in das Modell der Schnellheizanlage 1 eingegeben, wie durch die gestrichelte Linie 78 dargestellt ist. Durch den Block 80, der ein Teil des Gesamtmodells

- ist, wird in dem Modell als Anlage 1' eine Temperatur T des Wafers 2' angegeben, die einen Einfluss auf die Zustände des Wafermodells bzw. der Zustände der anderen Modelle und/der das Modell des Wafer 2' bzw. die anderen Modelle besitzt. Anhand der Ansteuerleistung, und der vorgegebenen
- 5 Temperatur T für den Wafer 2' berechnet das Modell der Schnellheizanlage 1' ein vorhergesagtes Pyrometersignal $(DC + AC)_{\text{kompl.-vorh.}}$ und überträgt dieses an den Block 82. Das gemessene Pyrometersignal aus dem Block 72 und das vorhergesagte Pyrometersignal 82 werden beide in dem Block 84 übertragen, in dem eine Differenz zwischen diesen beiden Werten berechnet wird. Aus der
- 10 Differenz wird dann eine Regelgröße bestimmt, die in den Block 80 übertragen wird, um die dort bestimmte Temperaturgröße T (die sich als Zustandsvariable eines Zustands des oder der Modelle ergibt) des Wafers 2' im Modell unter Berücksichtigung der Regelgröße zu verändern. Die Temperatur T wird auch aus dem Modell zu dem Kreis 82 ausgegeben und kann außerhalb des
- 15 Modells beispielsweise für eine Temperaturregelung oder Temperatursteuerung verwendet werden. Das in Fig. 5 gezeigte System vergleicht kontinuierlich oder in vorgebbaren zeitlichem Ablauf (z.B. mittels einer Tastfrequenz) das gemessene Pyrometersignal und das aus dem Modell vorhergesagte Pyrometersignal und versucht durch Auswahl geeigneter Zustände der Modelle
- 20 die Differenz gegen Null zu regeln. Wenn die Differenz Null oder innerhalb eines Toleranzbereichs ist, entspricht die modellierte Wafertemperatur T im Kreis 86 der tatsächlichen Wafertemperatur, die sich somit genau unter Verwendung eines einzelnen Waferpyrometers 26 ermitteln lässt.
- 25 Der bei 74 gezeigten tatsächlichen Strahlungsintensität steht bei 88 die modellierte Strahlungsintensität gegenüber, die gemäß dem Modell in eine Waferstrahlung und eine Lampenstrahlung unterteilt werden kann, da die jeweiligen Beiträge aus den Modellvorhersagen identifizierbar sind.
- 30 Bei der Beschreibung des Blockdiagramms in Fig. 4 wurde in all diesen Blöcken eine "ermittelte Emissivität" als Eingangsgröße verwendet. Wie die ermittelte Emissivität bestimmt wird, wird nachfolgend wiederum unter Bezugnahme auf Fig. 4 näher erläutert.

Wie schon weiter oben beschrieben, wird im Block 48 gemäß Fig. 4 ein Wafer-Vorhersagewert mit einem Lampen-Vorhersagewert addiert, um ein vorhergesagten Waferpyrometersignal $(DC + AC)_{\text{kompl.-vorh.}}$ zu erhalten. Dieses vorhergesagte Waferpyrometersignal, das sowohl einen Wechsel- wie auch einen Gleichanteil besitzt, wird zu einem Filter im Block 90 geleitet, in dem der Gleichanteil herausgefiltert wird. Das aus dem Block 90 austretende Signal beinhaltet somit lediglich einen Wechselanteil, der im Wesentlichen ausschließlich von der Modulation der Lampenstrahlung stammt. Dieses Signal wird als $AC_{\text{lampen-vorh.}}$ bezeichnet. Dieses Signal wird als Eingangsgröße in den Block 92 weitergeleitet. Als weitere Eingangsgröße wird ein gefilterter Anteil des gemessenen Waferpyrometersignals in den Block 92 eingeleitet. Hierzu wird das gemessene Waferpyrometersignal $(DC + AC)_{\text{kompl.-gem.}}$ durch einen Filter im Block 94 geleitet, um den Gleichanteil herauszufiltern. Das resultierende Signal entspricht dem gemessenen Wechselanteil des Waferpyrometersignals $AC_{\text{gem.}}$, das ebenfalls als Eingangsgröße in den Block 92 geleitet wird. Aus dem gemessenen Wechselanteil des Waferpyrometersignals und dem vorhergesagten Wechselanteil des Waferpyrometersignals wird im Block 92 ein Emissivitätswert für den Wafer bestimmt. Sofern der Wafer während der thermischen Behandlung gedreht d.h. rotiert wird, kann die Waferrotation, die einen der Rotationsgeschwindigkeit entsprechenden Wechselanteil erzeugen kann, bei der Bestimmung des Emissivitätswerts im Block 92 berücksichtigt werden.

Der im Block 92 ermittelte Emissivitätswert E_{wafer} wird nun an den Block 94 weitergeleitet, in dem er für nachfolgende Prozesse skaliert wird, und als $E_{\text{wafer-skal.}}$ an nachfolgende Bestimmungsprozesse geliefert wird.

Bei der obigen Emissivitätsbestimmung wird im Wesentlichen nur die Emissivität im Messbereich des verwendeten Strahlungsdetektors, wie beispielsweise des Waferpyrometers 26, wie beispielsweise bei $2,3 \mu\text{m}$ ermittelt. Diese Bestimmung erfolgt im Wesentlichen über die Reflektivität die mittels der Modulation der Strahlungsquellen ermittelbar ist.

Fig. 6 zeigt eine alternative Darstellung eines Systems zur Bestimmung der Emissivität gemäß der vorliegenden Erfindung, wobei die Darstellung in ihrem Aufbau der Darstellung gemäß Fig. 5 ähnelt. Daher werden in Fig. 6 dieselben Bezugszeichen verwendet wie in Fig. 5, sofern dieselben oder äquivalente Teile beschrieben werden.

Fig. 6 zeigt wiederum eine schematische Darstellung einer Schnellheizanlage 1 mit einem Gehäuse 4, sowie Strahlungsquellen 18 und einem darin aufgenommenen Halbleiterwafer 2. Ferner ist wiederum ein Pyrometer 26 gezeigt. Die Heizlampen 18 werden wiederum über eine Ansteuereinheit 70 angesteuert.

Bei 100 ist die tatsächlich gemessene Strahlungsintensität des Pyrometers 26 dargestellt, wobei in Fig. 6 nur der Wechselanteil dargestellt ist. Dieser Wechselanteil $AC_{\text{gem.}}$ wird von dem Pyrometer 26 auch an einen Block 102 weitergeleitet.

In einem Block 104 ist wiederum ein Modell der Schnellheizanlage dargestellt, wobei die Modellelemente wiederum mit einem Apostroph ' versehen sind. Das Modell der Schnellheizanlage 1' umfasst wiederum ein Modell des Wafers 2', der Kammer 4', der Heizlampen 18' sowie des Pyrometers 26'.

In dieses Modell wird wiederum die Ansteuerleistung der Ansteuereinheit 70 eingespeist, wie durch die gestrichelte Linie 78 angezeigt ist. In dem Kasten 104 ist ferner ein Block 106 angegeben, in dem eine Emissivität des Wafers bei $2,3 \mu\text{m}$ festgelegt wird, die in das Modell des Wafers 2' eingeht, und zu dem Oval (Schnittstelle) 108 ausgegeben wird. Innerhalb des Modells wird nunmehr anhand der an die Schnellheizanlage 1 angelegten Ansteuerleistung ein Wechselanteil des Pyrometersignal vorhergesagt $AC_{\text{vorh.}}$. Dieses Signal wird an den Block 110 übertragen, und von dort an den Block 112. Das Signal $AC_{\text{gem.}}$ aus dem Block 102 wird ebenfalls in den Block 112 übertragen. In dem Block 112 wird eine Differenz zwischen dem tatsächlich gemessenen Wechselanteil des Pyrometersignals und dem vorhergesagten Wechselanteil des

Pyrometersignals bestimmt und aus dieser Differenz wird wiederum ein Regelparameter ermittelt, der an den Block 106 geliefert wird. Anhand des Regelparameters wird im Block 106 die Emissivität als Zustandsvariable des Wafers geändert und sowohl in das Modell des Wafers 2' eingespeist als auch zu dem Oval (einer Schnittstelle) 108 ausgegeben.

Das System ist wiederum so aufgebaut, dass es versucht, die Differenz ΔAC auf Null zu reduzieren, so dass die modellierte Emissivität mit der tatsächlichen Emissivität des Wafers übereinstimmt.

10

Die unterschiedlichen zuvor verwendeten Modelle können in unterschiedlicher Weise aufgebaut werden. Bei dem Lampenmodell kann eine Kalibrierung des Lampenmodells, und insbesondere die Auswirkung jeder einzelnen Lampe auf das Modell, sowie die Gewichtung jeder Lampe hinsichtlich des vorhergesagten Pyrometersignal anhand eines Kalibrationsverfahrens ermittelt werden. Bei einem derartigen Kalibrationsverfahren können jeweils einzelne Lampen betrieben und die davon ausgehende Lampenstrahlung gemessen werden. Dies kann mit und ohne Wafer in der Schnellheizanlage erfolgen. Mit Wafer in der Schnellheizanlage wird der Gewichtungsfaktor für das vorhergesagte Pyrometersignal der Lampen ermittelt, während ohne Wafer die reine Strahlungsintensität der Lampe bei einer bestimmten Ansteuerleistung ermittelt wird.

15

Darüber hinaus kann in dem zuvor beschriebenen System ein Verfahren integriert werden, bei dem Unregelmäßigkeiten auf einer Seite des Halbleiterwafers, wie beispielsweise Flecken, auf die das Pyrometer gerichtet ist, vor dem Beladen des Wafers in die Schnellheizanlage 1 erkannt werden. Dies kann durch Scannen der besagten Oberfläche erfolgen und ein Kartografieren der Unregelmäßigkeiten. Beispielsweise können die einzelnen Schichten eines Stapels durch eine Mehrpunktmessung ermittelt werden. Diese Werte werden in das Temperaturberechnungsmodell eingegeben, so dass die Unregelmäßigkeiten bekannt sind und dementsprechend kompensiert werden können.

20

25

30

Somit lässt sich die Emissivität des Wafers bei jeder individuellen Temperatur berechnen und steht einer entsprechenden Steuereinheit bzw. dem Modell zur Verfügung.

5

Die Messung und Kartografierung der Rückseite kann bei Raumtemperatur durch ein Spektralelypsometer in Echtzeit durchgeführt werden, während der Wafer auf seine thermische Behandlung wartet. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Oberflächenreflexionsmessung und eine Kartografierung der Oberseite bzw. der Oberfläche, die ebenfalls bei Raumtemperatur erfolgen könnte.

10

Dieses Verfahren, das Informationen für das Temperaturberechnungsmodell liefern kann, kann alternativ auch in einem herkömmlichen System zur Temperaturbestimmung eines Wafers eingesetzt werden.

15

Obwohl die Erfindung zuvor anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels beschrieben wurde sei bemerkt, dass die Erfindung nicht auf die konkret dargestellten Ausführungsformen beschränkt ist und insbesondere auch Ausführungsformen umfaßt, die sich durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen ergeben.

20

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage, bei der das Substrat mit Strahlungsquellen erhitzt wird, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:
 - Erfassen einer Ansteuergröße der Strahlungsquellen;
 - Erfassen einer Messgröße eines Objekts in der Schnellheizanlage;
 - Bestimmen eines Vorhersagewerts der Messgröße des Objekts;
 - Bestimmen einer Regelgröße aus der Differenz zwischen der erfassten Messgröße und dem Vorhersagewert der Messgröße; und
 - Bestimmen wenigstens einer Zustandsvariable eines Zustands des Halbleiterwafers anhand eines Modells aus Schnellheizanlage und Halbleiterwafer unter Verwendung der Ansteuergröße der Strahlungsquellen und der Regelgröße, wobei das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße wenigstens teilweise anhand der bestimmten Zustandsvariable erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Zustandsvariable wenigstens die Temperatur des Halbleiterwafers umfasst.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Messgröße wenigstens vom Halbleiterwafer kommende Strahlung umfasst, die durch einen Pyrometer erfasst wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die erfasste Strahlung wenigstens Wärmestrahlung des Halbleiterwafers sowie am Halbleiterwafer reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen umfasst.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlung der Strahlungsquellen eine Modulation aufweist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße das Bestimmen eines Wafer-Vorhersagewerts umfasst, der einen durch den Halbleiterwafer bewirkten Anteil am Pyrometersignal vorhersagt.

5

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Wafer-Vorhersagewerts das Bestimmen eines Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Halbleiterwafers im Bereich einer Meßwellenlänge des Pyrometers anhand der ermittelten Zustandsvariable und einer ermittelten Emissivität des Halbleiterwafers umfasst.

10

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Wafer-Vorhersagewerts anhand eines Modells unter Berücksichtigung des Intensitätswerts der Waferstrahlung im Bereich der Meßwellenlänge des Pyrometers und einer ermittelten Emissivität des Halbleiterwafers erfolgt.

15

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Modell einen Einfluss der Kammer auf die ermittelte Emissivität des Halbleiterwafers berücksichtigt.

20

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße das Bestimmen eines Lampen-Vorhersagewerts umfasst, der einen durch die Strahlungsquellen bewirkten Anteil am Pyrometersignal vorhersagt.

25

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Lampen-Vorhersagewerts das Bestimmen eines Breitband-Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Halbleiterwafers anhand der ermittelten Zustandsvariable und einer ermittelten Emissivität des Halbleiterwafers umfasst.

30

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Lampen-Vorhersagewerts das Bestimmen eines Intensitätswerts für die Strahlungsquellen anhand eines Lampenmodells und der Ansteuergröße der Strahlungsquellen umfasst.

5

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Lampenmodell Wechselwirkungen zwischen dem Halbleiterwafer und den einzelnen Strahlungsquellen berücksichtigt.

- 10 14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Lampenmodell den vorhergesagten Breitband-Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Halbleiterwafers als Eingangsgröße verwendet.

- 15 15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Lampenmodell Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Strahlungsquellen berücksichtigt.

- 20 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsquellen als Gruppen zusammengefasst sind und das Bestimmen des Intensitätswerts für die Strahlungsquellen für die jeweiligen Gruppen erfolgt.

- 25 17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung des Intensitätswerts für die Strahlungsquellen für die jeweiligen Gruppen anhand wenigstens zweier Repräsentanten der Gruppe erfolgt.

- 30 18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsquellen wenigstens innerhalb einer Gruppe mit derselben Ansteuergröße angesteuert werden.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass beim Bestimmen des Lampen-Vorhersagewerts ein Modell

verwendet wird, das den am Halbleiterwafer reflektierten Anteil der Lampenstrahlung, der in das Gesichtsfeld des Pyrometers fällt, vorhergesagt, und zwar anhand des bestimmten Intensitätswerts der Strahlungsquellen und einer ermittelten Emissivität des Halbleiterwafers.

5

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass das Modell die Reflektivität des Halbleiterwafers ermittelt.

10

21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass die Reflektivität anhand der ermittelten Emissivität ermittelt wird.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 19 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass das Modell die Kammergeometrie berücksichtigt.

15

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7 und 16 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorhersagewert der Messgröße durch addieren des Wafer-Vorhersagewerts und des Lampen-Vorhersagewerts gebildet wird.

20

24. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass der Wafer-Vorhersagewert im Wesentlichen einen Gleichanteil des Vorhersagewerts der Messgröße beinhaltet und der Lampen-Vorhersagewert im Wesentlichen einen Gleichanteil sowie einen Wechselanteil des Vorhersagewerts der Messgröße beinhaltet.

25

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Emissivität des Halbleiterwafers wenigstens teilweise aus dem Vorhersagewert der Messgröße ermittelt wird.

30

26. Verfahren nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorhersagewert der Messgröße gefiltert wird, um dessen Wechselanteil zu ermitteln, der im Wesentlichen dem modulierten Anteil der von den

Strahlungsquellen stammenden und am Halbleiterwafer reflektierten Strahlung entspricht.

- 5 27. Verfahren nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass die Emissivität des Halbleiterwafers durch ein Modell ermittelt wird, dass den Wechselanteil des Vorhersagewerts der Messgröße und einen vom Pyrometer erfassten Wechselanteil der vom Halbleiterwafer kommenden Strahlung verwendet.
- 10 28. Verfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass der Halbleiterwafer in der Schnellheizanlage rotiert wird, und die Rotationsgeschwindigkeit und/oder Phase im Modell zum Ermitteln der Emissivität und/oder optischen Fluktuationen des Substrates und/oder eines Waferträgers des Halbleiterwafers berücksichtigt wird.
- 15 29. Verfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass die im Modell zum Ermitteln der Emissivität ermittelte Emissivität skaliert wird, bevor sie anderen Prozessen zugeführt wird.
- 20 30. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Halbleiterwafer in dem Modell zum Ermitteln der Zustandsvariable als Black Body angesehen wird.

Zusammenfassung

Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage, bei der das Substrat mit Strahlungsquellen erhitzt wird, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

- Erfassen einer Ansteuergröße der Strahlungsquellen;
- Erfassen einer Messgröße eines Objekts in der Schnellheizanlage;
- Bestimmen eines Vorhersagewerts der Messgröße des Objekts;
- Bestimmen einer Regelgröße aus der Differenz zwischen der erfassten Messgröße und dem Vorhersagewert der Messgröße; und
- Bestimmen wenigstens einer Zustandsvariable eines Zustands des Halbleiterwafers anhand eines Modells aus Schnellheizanlage und Halbleiterwafer unter Verwendung der Ansteuergröße der Strahlungsquellen und der Regelgröße, wobei das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße wenigstens teilweise anhand der bestimmten Zustandsvariable erfolgt.

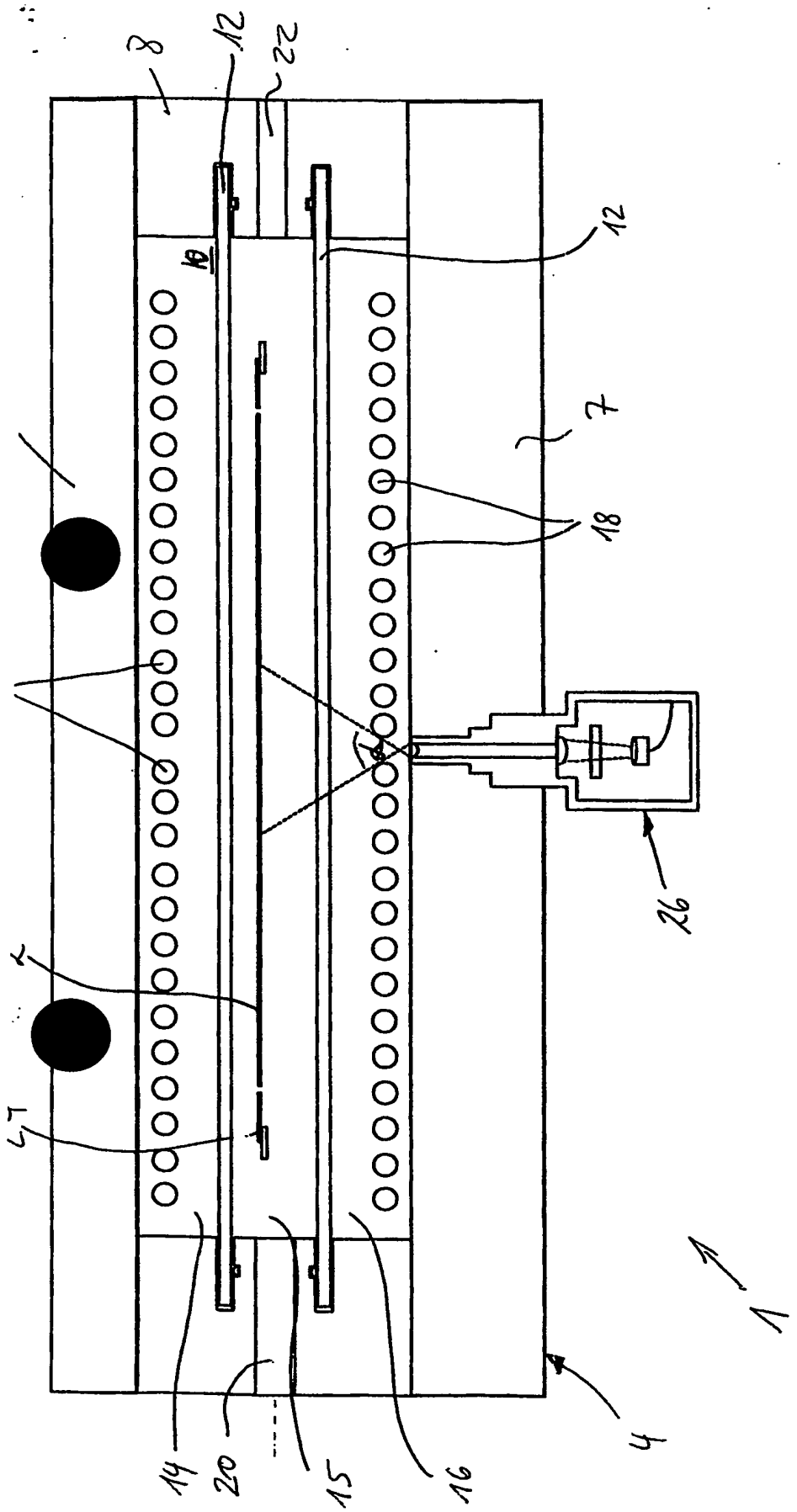


Fig 1

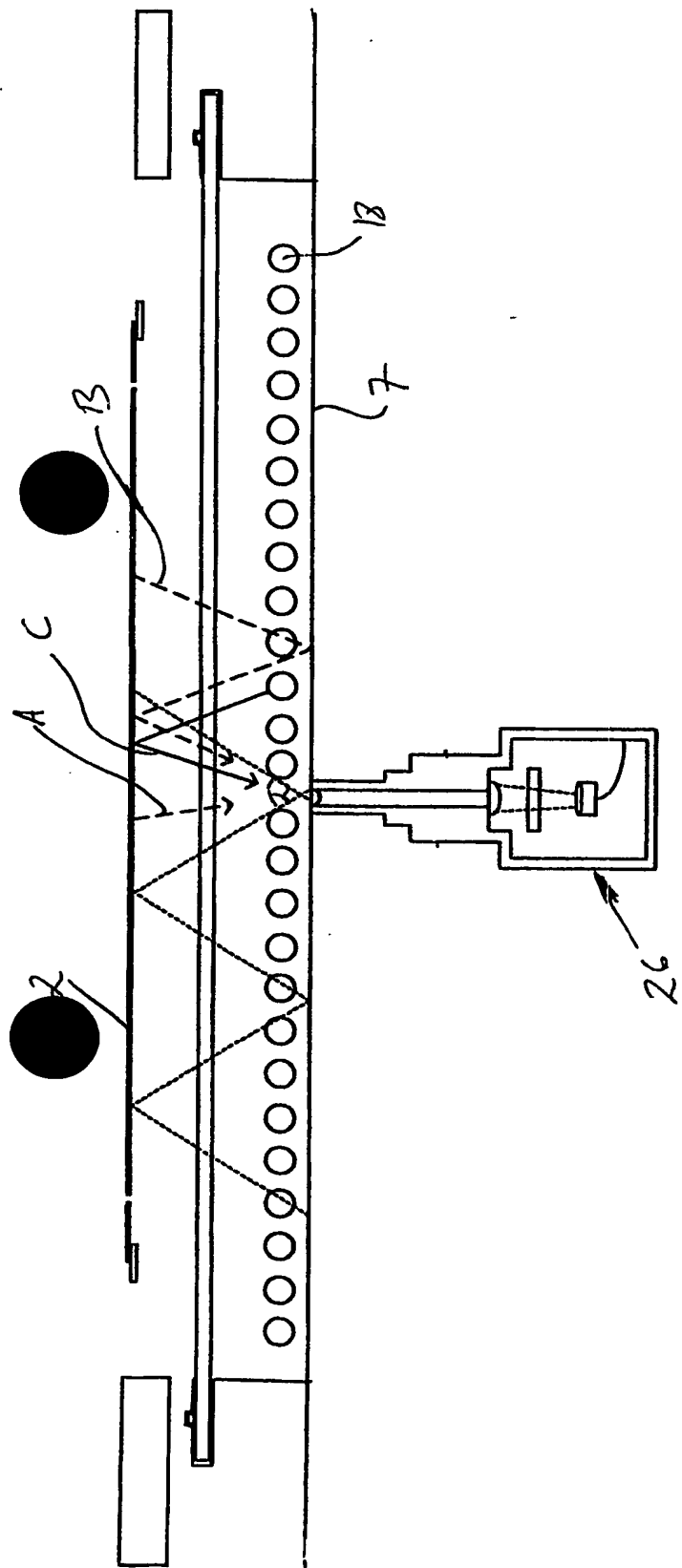


Fig. 2

Fig. 3

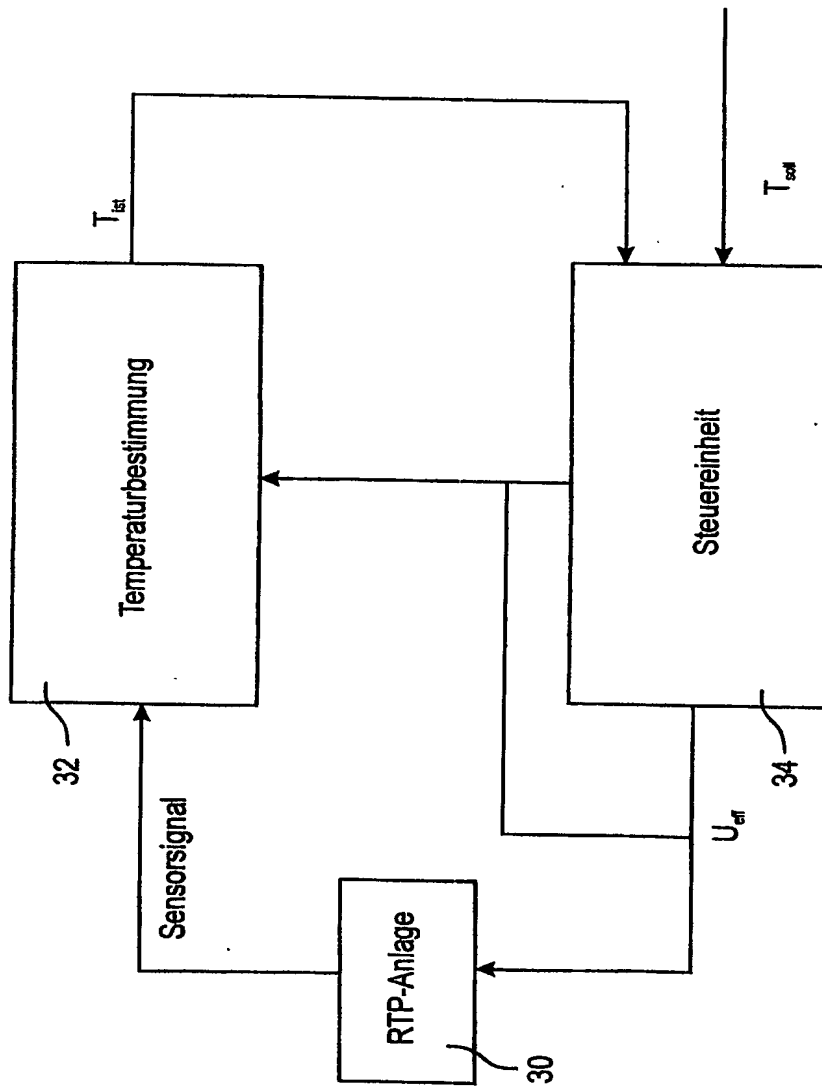
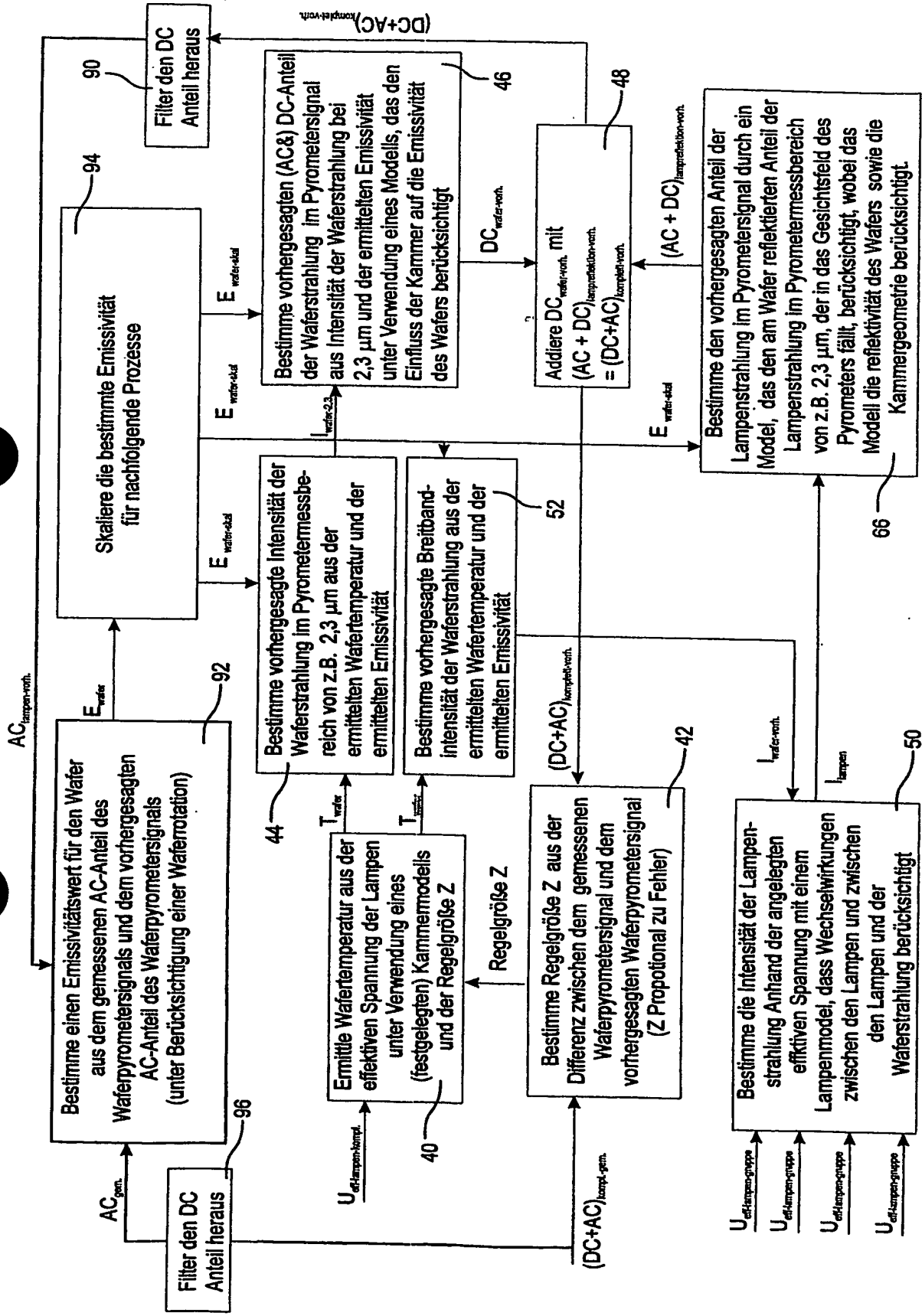
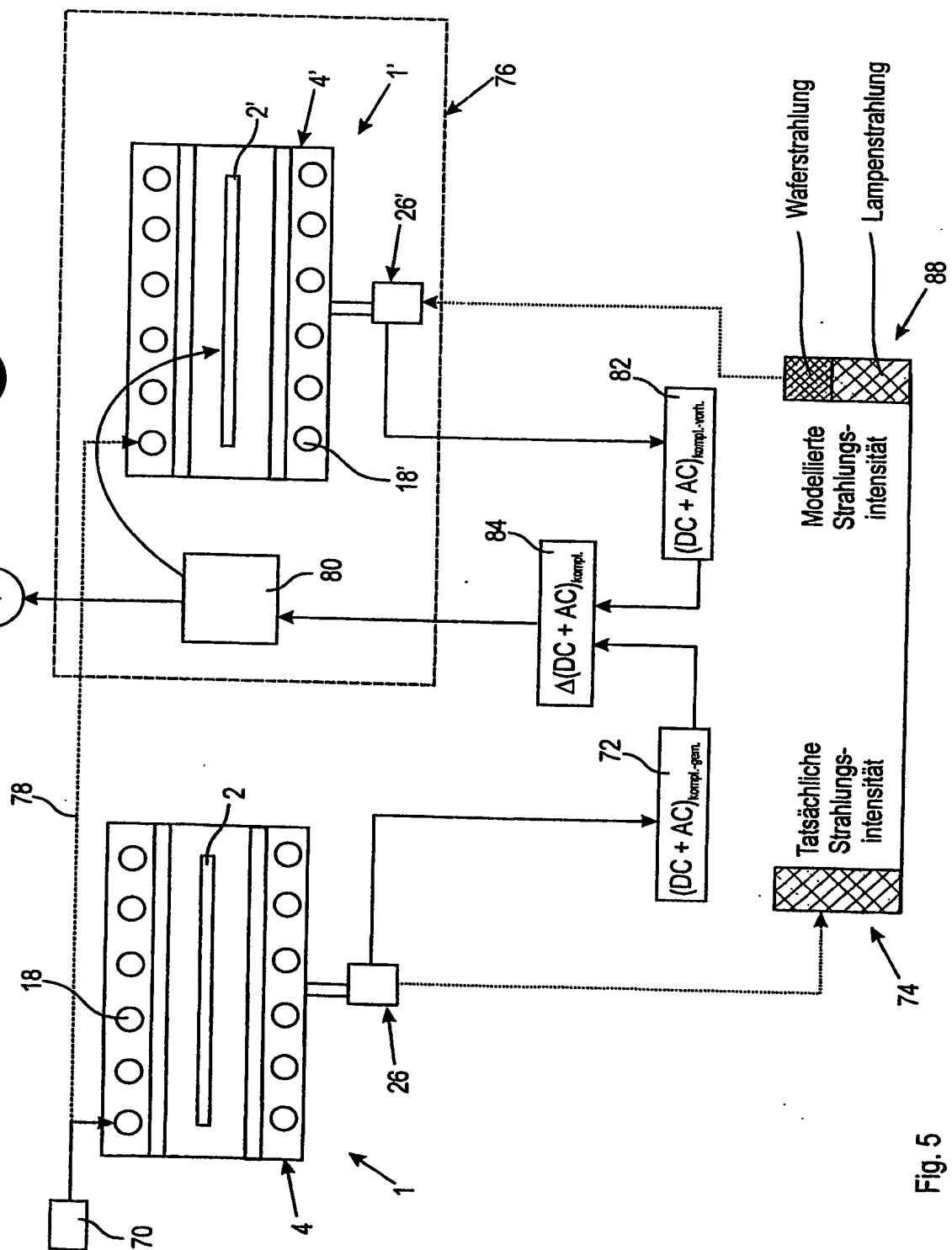


Fig. 4





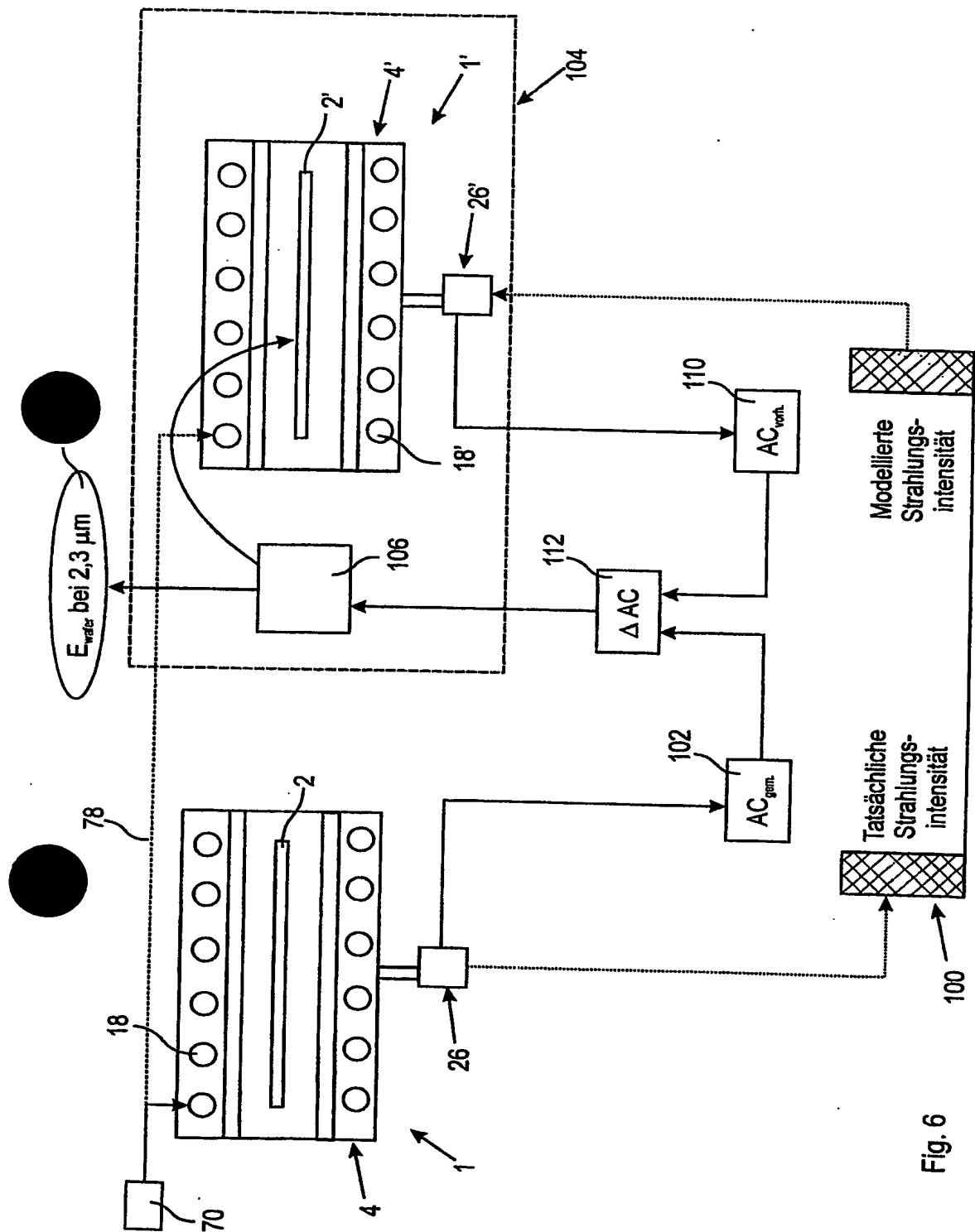


Fig. 6

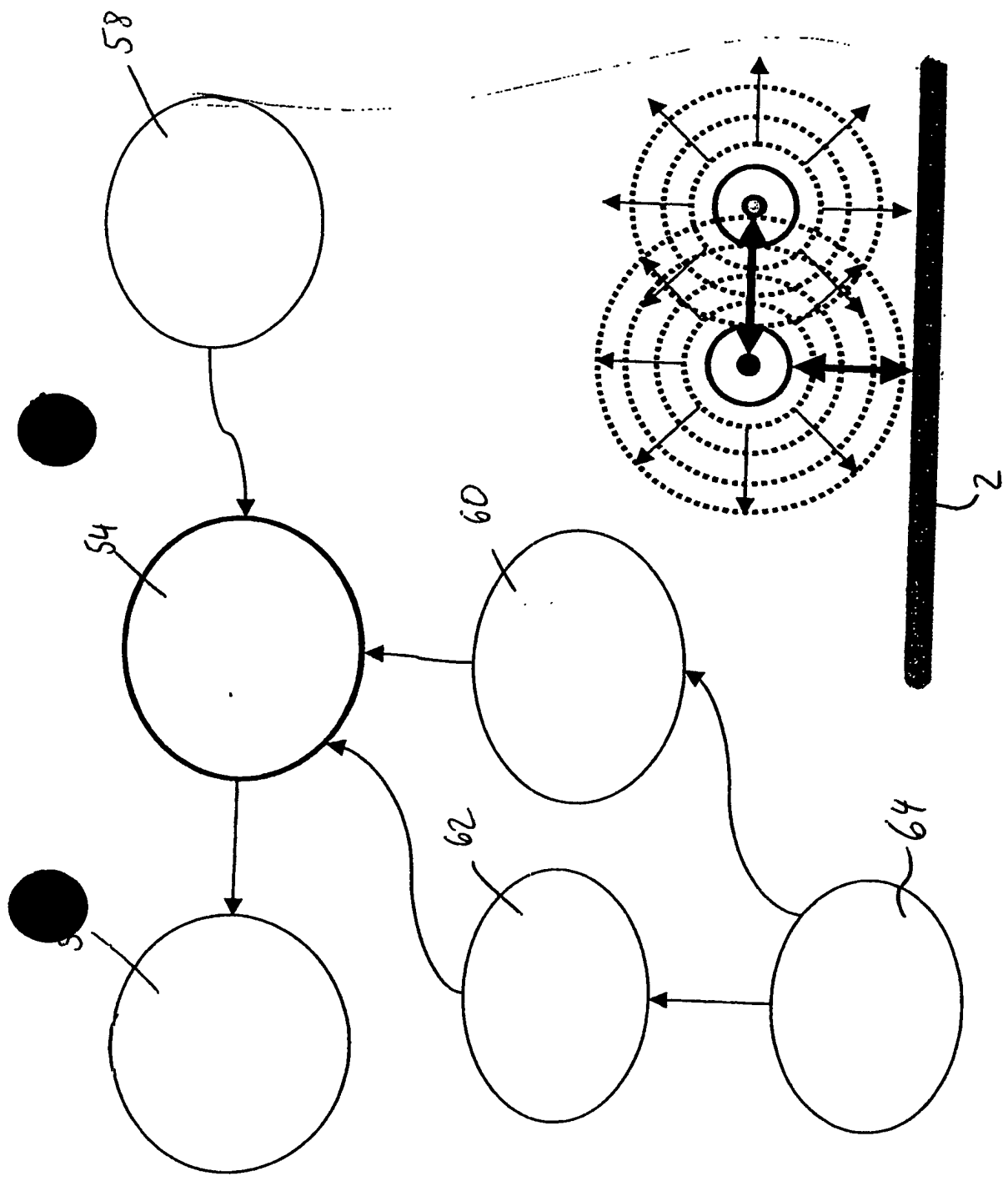


Fig. 7